

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕТЛИ ФАЗА-НУЛЬ КАБЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДО 1 КВ

Ю.И. СОЛУЯНОВ, Р.Р. ТАГИРОВ

Казанский государственный энергетический университет

В статье проведен анализ существующих методов расчета сопротивления цепи фаза-нуль небронированных кабелей до 1 кВ с непроводящей оболочкой. Предложен метод расчета сопротивления цепи «фаза-нуль», предполагающий использование в качестве дополнительного PEN- проводника металлических частей строительного каркаса производственного здания.

Для оценки погрешности предлагаемой методики проведены экспериментальные исследования электромагнитных процессов при однофазном коротком замыкании на Станко - инструментальном заводе ЕлАЗа.

По предложенной методике рассчитаны и представлены в таблицах сопротивления петли «фаза-нуль» для различных сечений фазной и нулевой жилы кабеля.

В настоящее время пп. 1.7.79 и 1.7.83 ПУЭ [1] предписывают использование металлического или железобетонного каркаса здания в системе дополнительного уравнивания потенциала как дополнительную защиту при косвенном прикосновении. Также, в соответствии с п.1.7.131 [1], в многофазных цепях в системе TN для стационарно проложенных кабелей, жилы которых имеют площадь поперечного сечения не менее 10 мм² по меди или 16 мм² по алюминию, функции нулевого защитного (PE) и нулевого рабочего (N) проводника могут быть совмещены в одном проводнике (PEN-проводник). Таким образом, начиная с сечения кабеля 10 мм² по меди и 16 мм² по алюминию, систему TN следует рассматривать как систему TN-C, где металлический или железобетонный каркас здания является дополнительным PEN - проводником, входящим в сопротивление петли фаза – нуль.

В данной статье предложен метод расчета сопротивления петли фаза-нуль в сетях до 1кВ с заземленной нейтралью промышленных электроустановок. Метод предполагает использование каркаса металлического или железобетонного здания в качестве дополнительного PEN- проводника.

В настоящее время учет дополнительного нулевого проводника, в качестве которого выступает металлический или железобетонный каркас здания, в практике проектных организаций не производится.

В данной работе решалась задача разработки методики расчета сопротивления петли фаза-нуль с учетом дополнительного PEN-проводника, в качестве которого выступает строительный каркас здания.

Определение собственного сопротивления кабельной линии велось с учетом электромагнитных процессов, связанных с влиянием земли на сопротивление жил кабеля, по формуле, предложенной Карлсоном-Поллячеком [2]:

$$Z = r_a + j\omega \left(2 \ln \frac{2}{\gamma |k| R} + 1 - j \frac{\pi}{2} + \frac{\mu}{2} \right) \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где $r_a = (\rho_a / q) \cdot 10^3$ - активное сопротивление неферромагнитного проводника, Ом/км; ρ_a - удельное сопротивление материала проводника, Ом·мм²/м; q - сечение проводника, мм²; μ - относительная проницаемость проводника; γ - постоянная

Эйлера, $\gamma = 17811$; $R = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{q}{\pi}}$ - радиус сечения проводника, см;

$|k| = \sqrt{\frac{0,4\pi\omega}{\rho}} \cdot 10^{-5}$ - физический параметр, характеризующий электромагнитные свойства системы, см⁻¹; ρ - удельное сопротивление земли, Ом·м.

В таблице 1 даны значения собственных сопротивлений жил алюминиевых и медных кабелей, начиная с сечения 16 мм², рассчитанных по формуле (1) в сравнении их с данными, представленными в «Рекомендациях по расчету петли фаза-нуль» [3].

Таблица 1

Собственные сопротивления жил кабелей, рассчитанных по формуле (1), в сравнении их с данными, представленными в [3]

Сечение жилы (мм ²)	Собственные сопротивления жил кабеля, Ом/км			
	Алюминий		Медь	
	представленные в [2]	рассчитанные по формуле (3)	представленные в [2]	рассчитанные по формуле (3)
16	2,304	1,952	1,370	1,427
25	1,470	1,408	0,873	1,114
35	1,050	1,159	0,625	0,978
50	0,740	0,993	0,436	0,890
70	0,527	0,898	0,313	0,838
95	0,388	0,843	0,230	0,807
120	0,308	0,814	0,181	0,790
150	0,246	0,792	0,146	0,776
185	0,200	0,777	0,122	0,765
240	0,153	0,761	0,090	0,753

Как видно из таблицы 1, индуктивная составляющая собственного сопротивления проводника, рассчитанного по формуле (1), при больших сечениях оказывает значительное влияние на полное собственное сопротивление и приводит к его увеличению, тогда как собственное сопротивление жил кабелей в рекомендациях [3] представлено только активным сопротивлением.

При разработке данной методики предлагается также учитывать взаимное сопротивление между проводниками, используя формулу, предложенную Марголиным [4]:

$$X_{ij} = 0.428 - (0.144 \lg a_{ij}) , \quad (2)$$

где a_{ij} – расстояние между проводниками.

Для оценки погрешности методики были проведены экспериментальные исследования, объектом которых явился Станко-инструментальный завод ЕлАЗа.

Станко-инструментальный завод ЕлАЗа - это производственное 10-пролетное здание размером 409х243х18 м. Каркас здания собран из типовых металлических конструкций. Девять пролетов рабочие. В рабочих пролетах проложены технологические трубопроводы, смонтированы балки для тельферов. Конструкция каждого пролета, на которой смонтирована крыша, имеет 9 продольных поддерживающих элементов (швеллер № 45). Краткая характеристика основания здания:

- фундаменты буронабивные глубиной 12 м, диаметром до 2-х м;
- фундаменты под оборудование из монолитного железобетона глубиной до 6 м;
- полы бетонные, армировки металлической сеткой не имеют.

План расположения экспериментального участка изображен на рис.1. Экспериментальный участок сети представляет собой кабель АВВГ 3х16+1х10, расположенный на расстоянии 3 м от крайнего ряда колонн. Длина кабеля $L_1 = 113$ м. Напряжение $U=220$ В подавалось от автономной ТП 6/0,4 кВ, мощностью 400 кВА, кабелем АВВГ 3х95+1х50 длиной $L_2 = 298$ м.

В ходе эксперимента измерялось значение тока однофазного КЗ. Для получения достоверного результата с помощью осциллографирования определялся комплекс тока.

Схема эксперимента показана на рис. 2.

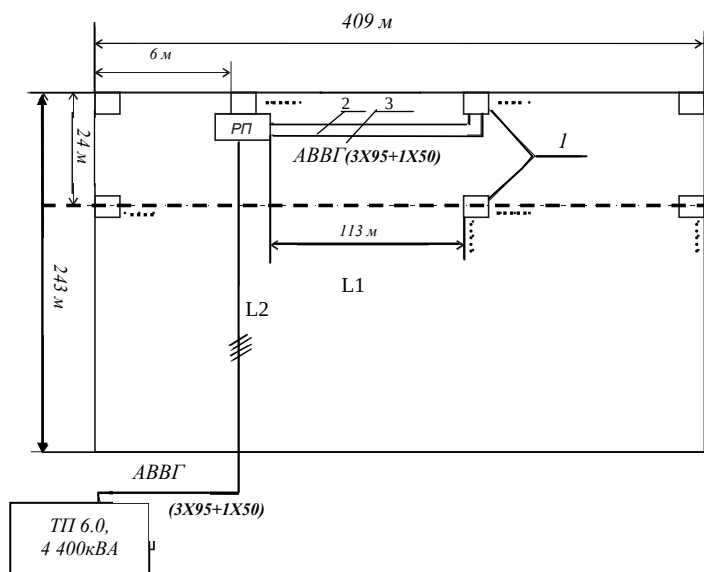


Рис. 1. План экспериментального участка СИЗа:

1 – колонны здания; 2 – фазный проводник; 3 - нулевой проводник

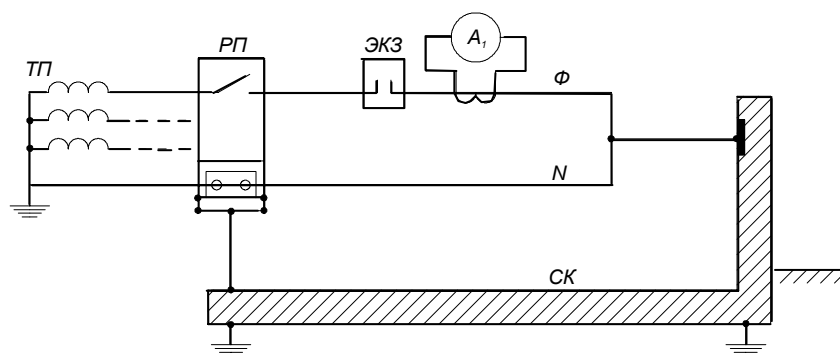


Рис.2. Схема проведения эксперимента: СК – строительная конструкция

Соответствующие схеме уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} I_1 Z_1 - I_2 Z_{12} - I_3 Z_{13} + I^{(1)}_3 Z_{23} - I^{(1)}_1 Z_{12} + I^{(1)}_2 Z_2 &= U / L \\ I_2 (Z_2 + Z_{23}) - I_1 (Z_{12} - Z_{13}) + I_3 (Z_{23} - Z_3) &= 0 \\ I_1 &= I_2 + I_3 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где U – падение напряжения на линии L_2 ; L – длина линии L_2 ; Z_1, Z_2 – собственное сопротивление фазной и нулевой жилы, Ом/км; Z_3 – собственное сопротивление металлического каркаса, $Z_3 = 0,32e^{j60}$, Ом/км [5]; I_1, I_2, I_3 – токи, соответственно, в фазной жиле, нулевой жиле и в каркасе; Z_{12}, Z_{23}, Z_{13} – взаимное сопротивление, соответственно, между фазной и нулевой жилой, нулевой жилой и каркасом, фазной жилой и каркасом, Ом/км;

Обозначив полное сопротивление петли $Z_{\Pi L_1} = U / I_1$, а отношение токов

$I_2 / I_1 = \alpha, I_3 / I_1 = 1 - \alpha$, решение уравнения (3) можно записать в виде

$$Z_{\Pi L_1} = Z_1 - Z_{12} + \alpha \cdot (Z_2 - Z_{12}) - (1 - \alpha)(Z_{13} - Z_{23}), \quad (4)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{Z_3 + Z_{12} - Z_{13} - Z_{23}}{Z_2 + Z_3 - 2Z_{23}}. \quad (5)$$

Погрешность вполне допустима для инженерных расчетов.

В таблице 2 даны значения сопротивления петли фаза-нуль для различных сечений кабелей АВВГ и ВВГ, представленных в Рекомендациях [3], в сравнении их со значениями, полученными при использовании предлагаемой методики, учитывающей металлический каркас здания в качестве дополнительного нулевого проводника.

Сопротивление петли фаза-нуль в [3] определяется суммой активных сопротивлений фазной и нулевой жил. Сопротивление петли фаза-нуль, рассчитанное по предлагаемой методике, учитывает параллельную работу

нулевого проводника и каркаса здания, а также электромагнитные процессы, связанные с влиянием земли на сопротивление петли фаза-нуль.

Таблица 2

Сопротивление петли фаза-нуль, рассчитанное по предлагаемой методике, в сравнении с данными, представленными в [3]

Сечение жилы, мм ²		Сопротивление петли фаза-нуль, Ом/км			
фазная	нулевая	Алюминиевые жилы		Медные жилы	
		рассчитанное по предложенной методике	представленное в [3]	рассчитанное по предложенной методике	представленное в [3]
16	16	2,002	4,600	1,424	2,740
25	16	1,757	3,775	1,318	2,243
25	25	1,680	2,945	1,199	2,746
35	16	1,461	3,350	1,128	1,995
35	35	1,295	2,101	0,905	1,250
50	25	1,159	2,210	0,857	1,309
50	50	0,966	1,480	0,663	1,309
70	25	1,014	1,997	0,761	1,186
70	35	0,919	1,577	0,66	0,938
70	70	0,722	1,054	0,493	0,626
95	35	0,822	1,438	0,596	0,855
95	50	0,714	0,247	0,501	0,666
95	95	0,551	0,776	0,378	0,46
120	35	0,765	1,358	0,558	0,806
120	70	0,563	0,835	0,392	0,494
120	120	0,449	0,616	0,311	0,362
150	50	0,612	0,986	0,435	0,582
150	150	0,37	0,492	0,262	0,292

Исходя из данных таблицы видно, что шунтирующий эффект каркаса здания наиболее заметен при малых сечениях кабеля. Это объясняется преобладанием активной составляющей полного сопротивления, вследствие чего шунтирующий эффект строительного каркаса оказывает, в данном случае, наибольшее влияние. С другой стороны, мало изменяющаяся от радиуса жилы индуктивная составляющая полного сопротивления, рассчитанного по предложенной методике, оказывает влияние на сопротивление петли фаза-нуль пропорционально увеличению сечения кабеля, в то время как чисто активное сопротивление в [3] зависит только от сечения кабеля.

Выводы

1. Учет дополнительного PEN-проводника, в качестве которого выступает железобетонный каркас здания, позволяет уменьшить расчетное сопротивление петли фаза - нуль.

2. В рекомендациях [3] не учитывается индуктивная составляющая полного сопротивления петли фаза-нуль, что может привести к погрешности при расчетах минимального тока однофазного КЗ.

Summary

In clause the analysis of existing methods of calculation of resistance of a circuit phase – zero of the not reserved cables up to 1 kV with a non-conducting environment is carried out. It is offered method calculation of resistance of a circuit the “phase – zero” supposing as additional PEN-of a conductor to use metal parts of a building skeleton of an industrial building.

For an estimation of a level of an error of an offered method, experimental researcher of electromagnetic processes are carried out at single-phase short circuit on the machine Tool-tool factory of an automobile factory of Elabuga.

On the offered method are designed and submitted in tables of a circuit “phase – zero” for various sections phase and zero a conductor.

Литература

1. Правила устройства электроустановок (седьмое издание).- М.: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002.
2. Pollachek F. Uber das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung. Electriche Nachrichtentechnik, 1926, Bd 3, H.9.
3. Рекомендации по расчету сопротивления цепи фаза-нуль – М.: «ЦБНТИ», 1988.
4. Марголин Н.Ф. Токи в земле. - М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1947.
5. Солуянов Ю.И. Защитные меры электробезопасности нефтехимических предприятий.- Казань: «КГЭУ», 2002.

Поступила 17.03.2005